



移动扫码阅读

陈绍杰, 刘久潭, 汪 锋, 等. 基于 PCA-RA 的滨海矿井水源识别技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 217-225. doi: 10. 13199/j. cnki. cst. 2021. 02. 025

CHEN Shaojie, LIU Jiutan, WANG Feng, et al. Technological research on water source identification of coastal coalmines based on PCA-RA [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 217-225. doi: 10. 13199/j. cnki. cst. 2021. 02. 025

基于 PCA-RA 的滨海矿井水源识别技术研究

陈绍杰¹, 刘久潭¹, 汪 锋¹, 周景奎², 唐鹏飞², 高宗军³

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东能源龙口矿业集团 梁家煤矿, 山东 龙口 265700;

3. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘 要: 煤炭开采过程中矿井水害的发生, 严重威胁着煤矿的安全生产, 确定水源数量和类型对于矿井水害的防治具有重要意义。为了明确滨海煤矿矿井水补给来源的数量和类型, 以龙口梁家煤矿为例, 对矿区内不同水体(矿井水、第四系水和地表塌陷区积水)分别进行取样, 并基于水化学和主成分分析-残差分析(PCA-RA)进行矿井水源识别。结果表明: 梁家煤矿区内第四系水、地表塌陷区积水和矿井水中的主要化学组分含量差别较大, 且受到了海水入侵作用的影响。就均值而言, 矿井水中的阳离子质量浓度分别存在着 $\rho(\text{Na}^+) > \rho(\text{Ca}^{2+}) > \rho(\text{Mg}^{2+}) > \rho(\text{K}^+)$ 和 $\rho(\text{HCO}_3^-) > \rho(\text{Cl}^-) > \rho(\text{SO}_4^{2-}) > \rho(\text{Cl}^-)$ 的关系。不同水体中, Cl^- 和 Na^+ 均为优势阴、阳离子, 水化学类型以 Na-Cl 型为主, 并且 3 种水体之间存在着一定的水力联系。选取的水化学数据适合进行 PCA, 但仅根据特征值大于 1 或是累计方差贡献率大于 85% 来确定主成分的数量, 并不能很好地表征原始数据的全部信息。基于水化学和 PCA-RA 方法, 确定了梁家煤矿矿井水共有 5 个补给来源, 即海水、富 HCO_3^- 基岩水、塌陷区积水、混合水和第四系水。PCA-RA 法能有效地处理和表征原始水质数据信息, 可更加合理地确定矿井水的补给来源类型和数量。研究结果可为滨海煤矿区的水害防治提供科学依据。

关键词: 滨海煤矿区; 主成分分析; 残差分析; 水源识别; 梁家煤矿

中图分类号: TD741

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2021)02-0217-09

Technological yesearch on water source identiftcation of coastal coalmines based on PCA-RA

CHEN Shaojie¹, LIU Jiutan¹, WANG Feng¹, ZHOU Jingkui², TANG Pengfei², GAO Zongjun³

(1. School of Construction Management, Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou 221116, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The occurrence of mine water hazards during coal mining has seriously threatened the safety of coal mines. Determining the quantity and type of water sources is of great significance to the prevention of water hazards. In order to determine the quantity and type of mine water supply sources in coastal coal mine, taking Liangjia Coal Mine in Longkou as an example, different water bodies (mine water, quaternary water and accumulated water in the subsidence area) in the mining area were sampled respectively, and mine water sources were identified based on hydrochemistry and principal component analysis residual analysis (PCA-RA). The results show that the contents of main chemical components in Quaternary water, accumulated water in the subsidence area and mine water in Liangjia Coal Mine area are quite different, and are affected by seawater intrusion. In terms of mean value, the mass concentrations of cations and anions in mine water have the relationships of $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ and $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$, respectively. In different water bodies, Cl^- and Na^+ are dominant anions and cations, and the hydrochemical type is mainly Na-Cl type, and there is a certain hydraulic connection among the three water bodies. The selected water chemistry data is suitable for PCA, but the number of principal components is only determined based on the cri-

收稿日期: 2020-10-12; 责任编辑: 郭 鑫

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774194); “泰山学者工程”资助项目(tsqn201812067); 山东省自然科学基金重大基础研究资助项目(ZR2018ZC0740)

作者简介: 陈绍杰(1978—), 男, 河北定州人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: csjwyb@163.com

通讯作者: 刘久潭(1991—), 男, 山东潍坊人, 博士。E-mail: 740058441@qq.com

terion that the characteristic value is greater than 1 or the cumulative variance contribution rate is greater than 85%, which cannot well represent all the information of the original data. Based on the method of water chemistry and PCA-RA, it is determined that there are five recharge sources for mine water in Liangjia Coal Mine, namely seawater, HCO_3^- -rich bedrock water, accumulated water in the subsidence area, mixed water and Quaternary water. The PCA-RA method can effectively process and characterize the information of the original water quality data, and it can be more reasonable to determine the type and quantity of the recharge source of mine water. The research results can provide a certain scientific reference and basis for the prevention of water hazards in the coastal coal mine area.

Key words: coastal coal mining area; principal component analysis; residual analysis; water source identification; Liangjia Coal Mine

0 引言

我国煤矿水文地质条件复杂,煤炭开采过程中矿井水害时有发生,严重威胁着煤矿的安全生产,因此,开展矿井水水源识别研究意义重大^[1-3]。地下水在径流过程中,与周围岩土发生着复杂的水文地球化学反应,其水化学组分含量也会相应变化,形成了特有的物理化学特征,这些水化学特征承载着含水层的大量信息,可为矿井水水源判别提供重要依据^[4-6]。

目前,水源识别的方法较多,主要包括水温水位法^[7]、水化学分析法^[8-9]和数理统计分析法^[10-11]等。通常,在水文地质条件分析的基础上,利用水化学进行水源识别简单而有效^[12]。近年来,不少学者利用水化学数据,基于新技术和新的数学方法,建立了水源识别模型,为煤矿水害的防治工作做出了很大贡献。王亚等^[13]利用激光诱导荧光技术获取水样的荧光光谱并提取特征信息后,基于极限学习机构建了水源的快速识别模型。王心义等^[12]在熵权法和模糊可变集理论的基础上,建立了矿井突水水源识别模型。杨中元等^[10]结合主成分分析(PCA)和灰色关联分析(GRA),建立了PCA-GRA突水水源判别模型。然而,不同矿区水文地质条件复杂程度不同,不同识别方法均存在一定的优势和局限性^[12,14]。

笔者以我国最大的滨海煤矿龙口梁家煤矿为例,利用矿井水的主要离子测试数据,基于水化学和主成分分析-残差分析(PCA-RA)识别矿井水补给来源的数量和类型,为滨海煤矿区的水害防治提供科学参考。

1 研究区概况

梁家煤矿(图1)位于山东省龙口市,西至龙口渤海,北与北皂煤矿相邻,东北与桑园井田相接,东靠洼东煤矿,面积47.49 km²。矿区内地形平坦,由东南向西北逐渐降低。流经该区的地表水系主要有中村河和小恒河,均为季节性河流。

煤田内的含水层由上而下主要有:第四系砂砾层、泥灰岩、泥岩与泥灰岩互层、煤1、煤2及底板砂岩、煤3至煤4间砂岩等。第四系砂砾石层由细、中、粗砂及砾石组成,富水性极强。泥灰岩和砂岩等含水层富水性弱或中等,水化学类型主要为 HCO_3^- -Na、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}$ -Na或 $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3^-$ -Na。区内各煤层内生节理较发育,局部因构造影响裂隙发育,使煤岩中储存着裂隙水,但裂隙率小补给量不大,富水性弱。含煤地层的底部无强富水性含水层。区域内煤系地层含水层不直接接受大气降水的补给,主要接受南、东面山区基岩裂隙水侧向补给,煤田内部断裂虽较发育,但断裂带多被泥质岩类充填,其富水性和导水性弱,而各含水层的富水性也较弱,地下水从南、东向西北径流极为缓慢,正常情况下泄入渤海。矿井排水为煤系地层直接充水含水层的主要排泄途径。

2 材料与方法

2.1 水样采集与测试

2014—2019年于龙口梁家煤矿矿区内共采集矿井水水样60个,第四系水样9个,地表塌陷区积水水样12个,取样位置如图1b所示。选择干燥、清洁的聚乙烯塑料瓶采集水样,取样前先用待取水样清洗取样瓶2~3次;取样完成后,进行封口处理,并送至水化学实验室进行水质分析。水样分析主要测定的化学组分包括 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- 等。

2.2 数据分析方法

利用主成分分析-残差分析(PCA-RA)确定水源数量和类型^[6],思路如下:先基于PCA法将水化学数据进行压缩,确定主成分数量。然后利用RA将PCA结果以重构离子浓度的形式表现出来,并与原始浓度进行相关性分析。若离子浓度残差均表现为随机分布特征,说明已提取所有的有效信息。最后,对每个主成分进行合理解释,确定矿井水的补给来源类型。

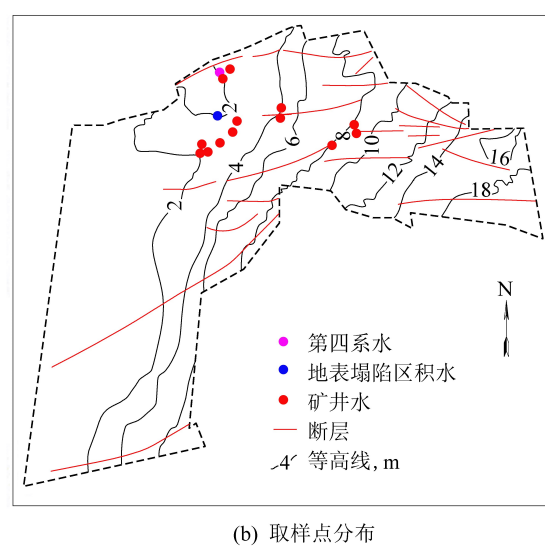
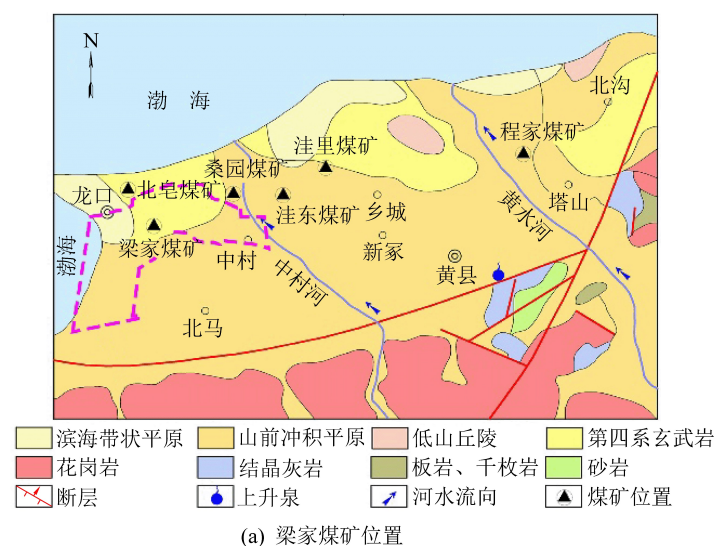


图 1 梁家煤矿位置及取样点分布

Fig.1 Location of Liangjia Coal Mine and sampling points

2.2.1 主成分分析(PCA)

PCA 是利用数学手段对原始水质数据进行降维,并提取水质数据多变量中的关键信息,用少数的新变量表征原始变量,但获得的新变量之间无相关关联,是广泛应用于多种学科的多元统计分析方法^[15-17]。PCA 的数学模型^[15]如下:

假设原始数据矩阵 X 的 p 个向量的线性组合为 $Y=AX$,即

$$\begin{cases} Y_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1p}x_p \\ Y_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2p}x_p \\ \vdots \\ Y_n = a_{p1}F_1 + a_{p2}F_2 + \cdots + a_{pp}x_p \end{cases} \quad (1)$$

简化为: $Y_i = a_{1i}x_1 + a_{2i}x_2 + \cdots + a_{pi}x_p$

其中, Y_i, Y_j 之间互不相关 ($i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, p$), 且各方差之间满足如下关系: $Y_1 > Y_2, Y_2 > Y_3, Y_3 > Y_4$, 以此类推。

PCA 包括 5 个步骤:①数据标准化处理,②计算相关系数矩阵,③计算特征值,④选取主成分,⑤计算主成分得分。在进行 PCA 时,应首先确定其适用性,可采用 Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) 和 Bartlett 球度检验进行适用性确定。Bartlett 球度检验法是以相关系数矩阵为基础,而 KMO 检验统计量则是比较变量间简单相关系数和偏相关系数的指标,表明原始变量的整体性,KMO 检验计算公式^[18]如下:

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} r_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} r_{ij}^2 + \sum_{i \neq j} p_{ij}^2} \quad (2)$$

式中: r_{ij} 为变量之间简单相关系数; p_{ij} 为指偏相关系数。

2.2.2 残差分析(RA)

在运用 PCA 法解决实际问题时,常常会面临保留几个主成分来表征原始数据的问题。通常是以保留特征值大于 1 或方差的累计贡献率大于 85% 的主成分为准则,但可能会导致原始数据中有价值的信息被遗漏,所选取的主成分不能很好地表征原始信息^[6]。因此,可利用 RA 法来检验保留主成分数量的合理性^[19],其计算公式如下:

$$x'_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j) / S_j \quad (3)$$

其中: x'_{ij} 为标准化的水质数据, x_{ij} 为原始数据; \bar{x}_j 为第 j 个指标的平均含量; S_j 为 j 个指标含量的标准差。将水质数据表示在主成分分析的前 m 维子空间上,如下:

$$\hat{x}_{ij} = x'_{ij} v^T (v v^T)^{-1} v \quad (4)$$

其中: v 为前 m 个特征向量; v^T 为 v 的转置; \hat{x}_{ij} 代表重构的指标的含量。残差 R 为:

$$R = \hat{x}_{ij} - x'_{ij} \quad (5)$$

3 结果与讨论

3.1 水化学特征

梁家煤矿矿井水、第四系水和地表塌陷区积水的主要离子统计结果如图 2 所示。由图 2 可知,3 种水体中主要阳离子均为 Na^+ , 占优势的阴离子为 HCO_3^- 或 HCO_3^- 和 Cl^- 。就均值而言,矿井水中阳离子和阴离子分别存在着 $\rho(Na^+) > \rho(Ca^{2+}) > \rho(Mg^{2+}) > \rho(K^+)$ 和 $\rho(HCO_3^-) > \rho(Cl^-) > \rho(SO_4^{2-}) > \rho(Cl^-)$ 的关系(图 2)。水化学类型 Durov 图,如图 3 所示。

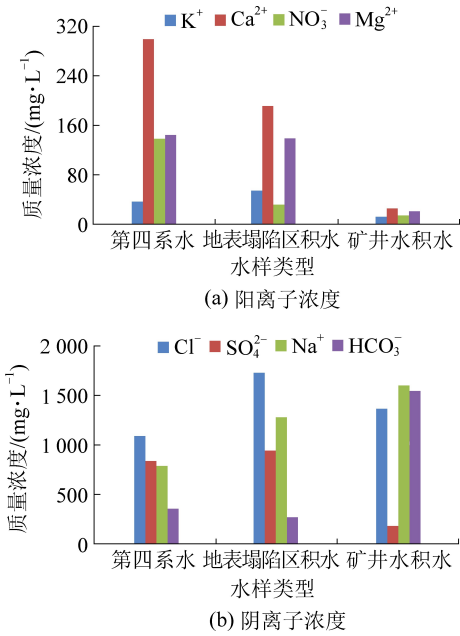


图 2 不同水体离子浓度

Fig.2 Ion concentration in different water bodies

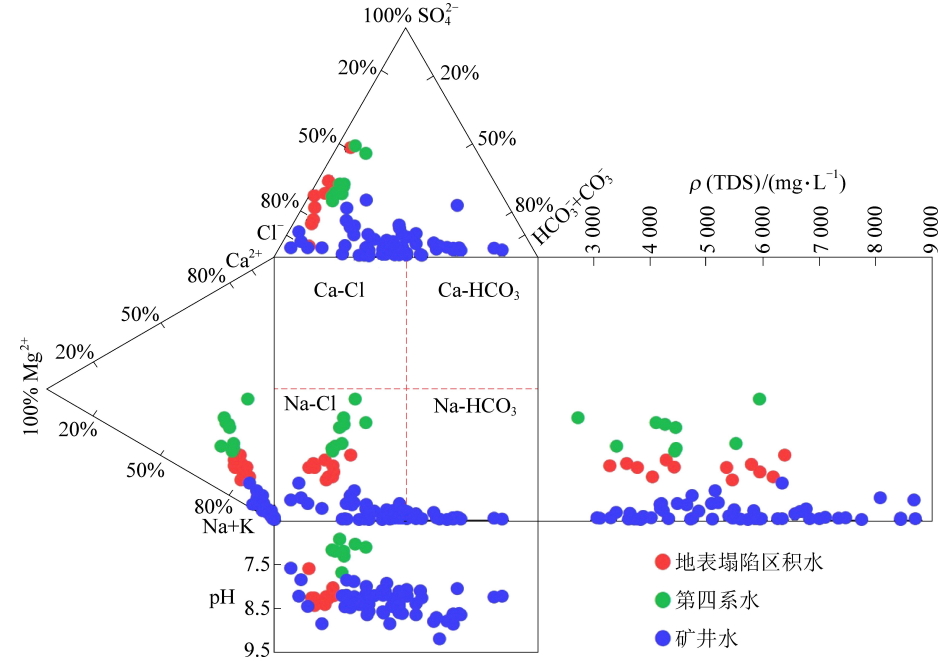


Fig.3 Durov diagram of different water bodies

表 1 Kaiser-Meyer-Olkin 和 Bartlett 球度检验

Table 1 Test of Kaiser-Meyer-Olkin and Bartlett			
取样足够多的 Kaiser-Meyer-Olkin 检验值	检验值	0.686	
	检验值	315.445	
Bartlett 球度检验	自由度	28	
	显著性水平	0	

3.2.2 结果分析

主成分特征值和方差贡献率见表 2。由表 2 知共有 3 个主成分的特征值超过 1, 因此基于特征值 220

整体上, 3 种类型的水中 Na^+ 和 Cl^- 的浓度均较高, 水化学类型主要为 $\text{Na}-\text{Cl}$ 型, 且矿井水中还存在 $\text{Na}-\text{HCO}_3$ 型, 说明 3 类水体均受到了一定程度的海水入侵作用的影响。此外, 也说明 3 种水体之间存在着一定的水力联系, 即矿井水可能受到第四系水和塌陷区积水的补给。对比主要离子浓度可以看出, 矿井水中 Na^+ 、 HCO_3^- 和 Cl^- 浓度较高, 第四系水和地表塌陷区积水中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的浓度较高, 且第四系水中 NO_3^- 的浓度最高。

3.2 矿井水水样主成分分析

3.2.1 主成分分析适用性检验

选取 60 个矿井水样品中的主要离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^-) 浓度数据, 利用 SPSS 24.0 软件进行主成分分析, 其中 KMO 检验值为 0.686, 大于 0.6, Bartlett 球形检验具有显著性, 见表 1, 表明选取的水化学数据适合用于主成分分析。

大于 1 的准则可得到前 3 个主成分。该 3 个主成分解释了 81.103% 的原始数据信息。

然而, 将 3 个主成分投影到平面上 (图 4), 根据平面上点的空间分布特征, 可以看出 3 个主成分并不能很好地表征原始数据的信息, 应该还有另外 2 个主成分。由表 2 知, 基于累计方差贡献率大于 85% 的准则, 也仅能得到前 4 个主成分。

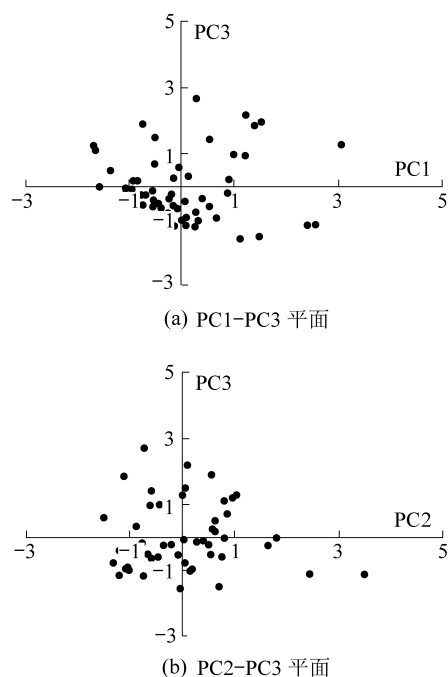


图 4 矿井水样品在 PC1-PC3 平面和 PC2-PC3 平面上的投影

Fig.4 Projection of mine water sample on
PC1-PC3 and PC2-PC3 planes

3.3 矿井水水样残差分析

为进一步识别水源数量,在主成分分析的基础上,进行残差分析。选用逐渐增加主成分数量的方法对离子浓度进行重构,并计算残差。当残差呈现出明显的结构性特征时,表明所提取的主成分数量不足以表征原始数据的全部信息^[6]。

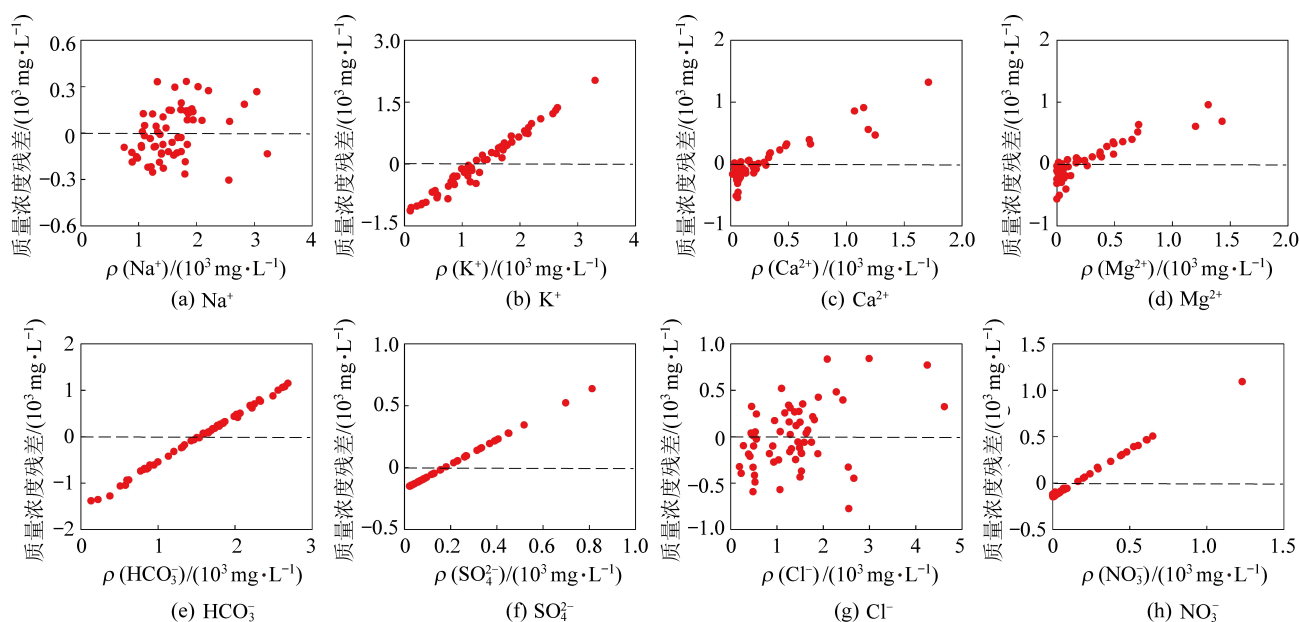
当保留第 1 个主成分(PC1)时, Na^+ (图 5a)和

表 2 主成分分析结果

Table 2 Results of principal component analysis

主成分	起始特征值		
	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
PC1	3.644	45.547	45.547
PC2	1.702	21.274	66.821
PC3	1.143	14.282	81.103
PC4	0.577	7.217	88.321
PC5	0.477	5.96	94.281
PC6	0.293	3.663	97.944
PC7	0.111	1.385	99.329
PC8	0.054	0.671	100

Cl^- (图 5g)表现出了显著的随机性,而其他离子则表现出明显的结构性,这表明 PC1 主要表征了 Na^+ 和 Cl^- (图 5a—图 5h)。当保留前 2 个主成分时, Ca^{2+} (图 5k)、 Mg^{2+} (图 5l)和 HCO_3^- (图 5m)的结构性减弱(图 5i—图 5p),表明第 2 个主成分(PC2)主要表征了上述 3 个离子的变化。当加入第 3 个主成分(PC3)时,增加 SO_4^{2-} 的随机性,即减弱了其结构性,且进一步减弱了 Ca^{2+} (图 6c)和 Mg^{2+} (图 6d)的结构性(图 6a—图 6h)。第 4 主成分(PC4)加入后,主要减弱了 K^+ (图 6j)的结构性(图 6i—图 6p)。引入第 5 个主成分(PC5)后,主要消除了 NO_3^- (图 5x)的结构性,同时,所有离子残差的绝对值均减小(图 6q—图 6x)。由此可得,仅仅基于特征大于 1 或是累计方差贡献率大于 85%的准则提取的主成分个数并不能较好地表征原始数据的有效信息。残差分析研究表明提取 5 个主成分才能消除所有离子的结构性,完整地表征水体信息。



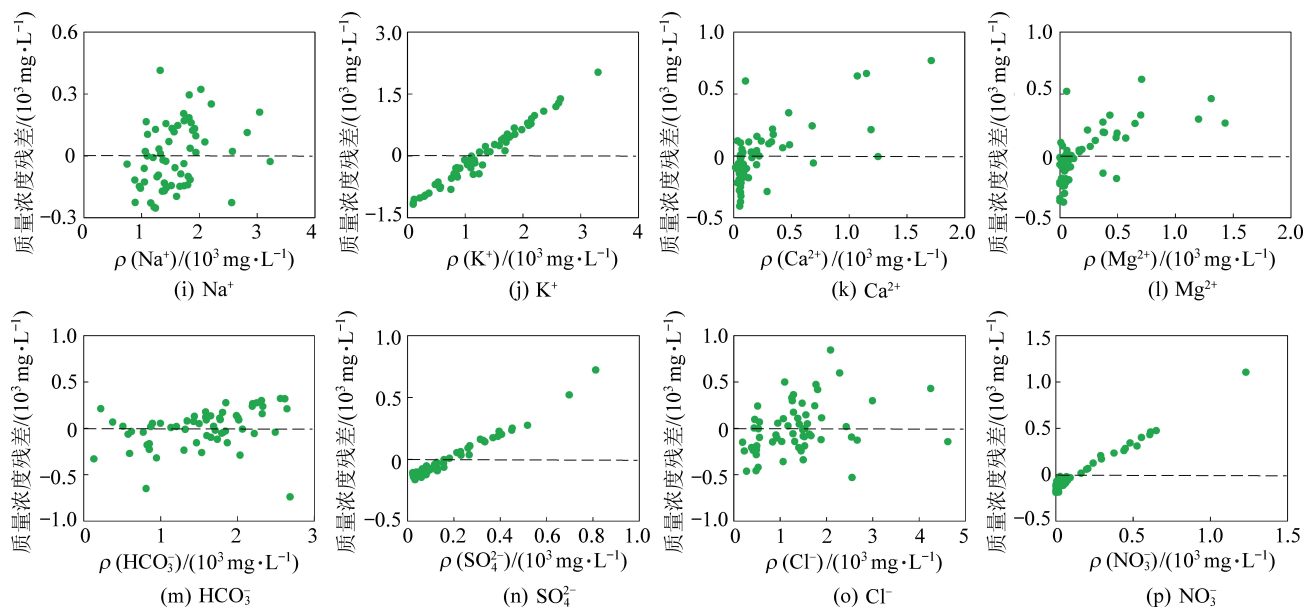


图6 保留第1个主成分(红色)和前两个主成分(绿色)后残差与原始离子质量浓度的相关性

Fig.6 Correlation between residual and original ion concentration after retaining the first PC (red) and the first two PCs (green)

3.4 水源数量与类型

为确定矿井水水源的数量和类型,利用RA进行进一步验证。PC1的特征值为3.644,解释了45.547%的原始数据信息(表2),主要消除了 Na^+ 和 Cl^- 的结构性(图5a—图5h)。矿井水中 Na^+ 和 Cl^- 的含量较高,且相关性好,溶解性总固体(TDS)的质量浓度均超过了3 000 mg/L(图2)。龙口沿海地区,地下水受海水入侵影响明显^[20-21]。因此,PC1可以解释为海水的参与。PC2的特征值为1.702,解释了21.274%的原始变量信息(表2)。加入PC2后,消除了 HCO_3^- 的结构性,并在一定程度上增加了 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 随机性(图5i—图5p)。梁家煤矿区泥灰岩、泥岩泥灰岩互层以及砂岩等含水层富水性较弱,水化学类型以 HCO_3^- 型为主,而当 HCO_3^- 含量较高时, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的含量较低(图2)。因此,PC2很好地表征了富 HCO_3^- 的基岩水。PC3解释了14.282%的原始数据信息(表2),消除了 SO_4^{2-} 的结构性,并进一步减弱了 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的结构性(图6a—图6h)。地表塌陷区积水中 SO_4^{2-} 质量浓度较高,且 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的质量浓度也相对较高(图2)。因此,PC3可以解释为矿井水受到了地表塌陷区积水的补给,这可能是由于煤炭开采造成地表塌陷后,塌陷区的积水沿破碎裂隙对矿井水进行了补给。

PC4特征值为0.577,解释了7.217%的原始变

量信息(表2),主要消除了 K^+ 的结构性(图6i—图6p)。海水中除了 Na^+ 和 Cl^- 的质量浓度很高外, K^+ 的质量浓度也很高。此外,地表塌陷区积水和第四系水中 K^+ 质量浓度也较高(图2),且水化学分析也表明塌陷区积水、第四系水和矿井水之间存在一定的联系。因此,PC4可以解释为海水、第四系水和塌陷区积水的混合补给。PC5特征值为0.477,对方差贡献较小,仅解释了5.96%的原始数据信息(表2),主要消除了 NO_3^- 的结构性,且其余离子的残差也明显减小(图6)。残差的普遍减小,表明PC5影响了地下水的整体演化,但影响较小。研究表明,矿区地下水的整体性演化趋势主要因为受到了浅部淡水的补给^[6]。另外,第四系水相对易受到人类活动的影响,水中 NO_3^- 的质量浓度较高(图2)。因此,PC5表征了第四系水对矿井水的补给。

综上所述,PCA中仅基于特征值大于1或是累计方差贡献率大于85%的准则,不能很好地表征原始数据的全部信息。利用PCA-RA法,确定5个主成分,可解释94.28%的原始数据信息,即梁家煤矿矿井共有5个补给来源,分别为海水、富 HCO_3^- 基岩水、塌陷区积水、混合水(海水、第四系水和塌陷区积水)和第四系水。基于水化学和PCA-RA法,可有效处理和表征原始水质数据信息,可更加合理地确定矿井水的补给来源类型和数量。

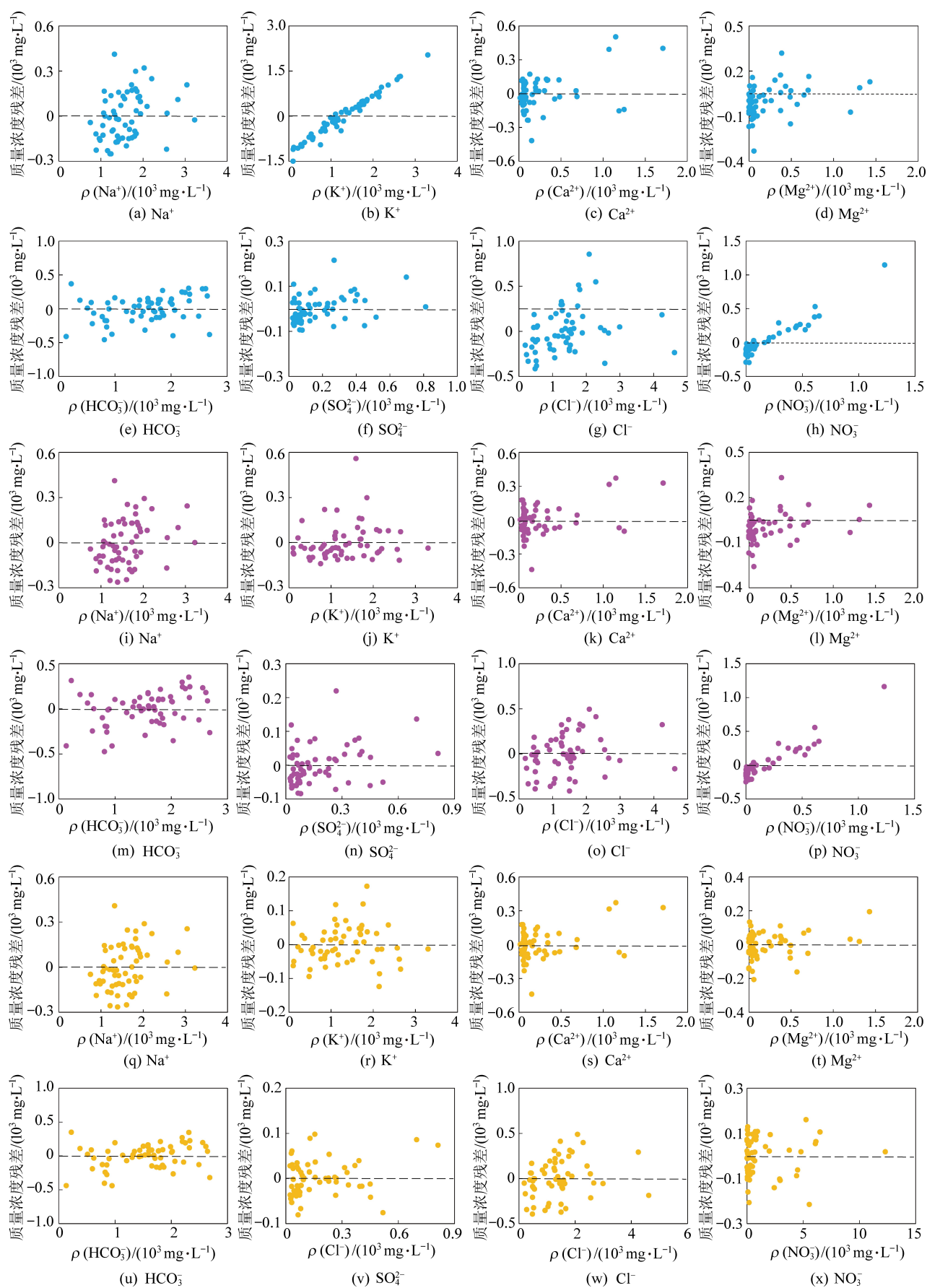


图 6 保留前三个(蓝色)、前四个(粉色)和前五个(黄色)主成分后残差与原始离子质量浓度的相关性

Fig.6 Correlation between residual and original ion concentration after retaining the first three PCs (blue), first four PCs (pink) and first five PCs (yellow)

4 结 论

1) 梁家煤矿区内第四系水、地表塌陷区积水和矿井水中的主要化学组分含量差别较大, Cl^- 和 Na^+ 为优势阴、阳离子, 水化学类型以 Na-Cl 型为主, 且受到了海水入侵作用的影响。

2) 在 PCA 中, 仅依据特征值大于 1 或累计方差贡献率大于 85% 的准则来确定主成分的数量, 并不能很好地表征原始数据的全部信息。

3) 选取矿井水的主要离子浓度数据, 利用水化学和 PCA-RA 法, 确定了梁家煤矿矿井水共有 5 个补给来源, 即海水、富 HCO_3^- 基岩水、塌陷区积水、混合水和第四系水。

4) 基于水化学和 PCA-RA 法, 可有效地处理和表征原始水质数据的有效信息, 可更加合理地确定矿井水的补给来源类型和数量。

参考文献 (References):

- [1] 武 强, 李 博, 刘守强, 等. 基于分区变权模型的煤层底板突水脆弱性评价: 以开滦蔚州典型矿区为例[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9): 1516-1521.
WU Qiang, LI Bo, LIU Shouqiang, *et al.* Vulnerability assessment of coal floor groundwater bursting based on zoning variable weight model: a case study in the typical mining region of Kailuan[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(9): 1516-1521.
- [2] 王甜甜, 靳德武, 刘 基, 等. 动态权-集对分析模型在矿井突水水源识别中的应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2840-2850.
WANG Tiantian, JIN Dewu, LIU Ji, *et al.* Application of dynamic weight-set pair analysis model in mine water inrush discrimination [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2840-2850.
- [3] QIAN J, TONG Y, MA L, *et al.* Hydrochemical characteristics and groundwater source identification of a multiple aquifers system in a coal mine[J]. Mine Water and the Environment, 2018, 37(3): 528-540.
- [4] 陈 凯, 孙林华. 煤矿区地下水常规离子定量化学来源解析[J]. 煤矿安全, 2019, 50(8): 173-178.
CHEN Kai, SUN Linhua. Source analysis of major ion quantification in groundwater of mine area [J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(8): 173-178.
- [5] 武亚遵, 潘春芳, 林 云, 等. 典型华北型煤矿区主要充水含水层水文地球化学特征及控制因素[J]. 地质科技情报, 2018, 37(5): 191-199.
WU Yazun, PAN Chunfang, LIN Yun, *et al.* Hydrogeochemical characteristics and controlling factors of main water filled aquifers in the typical north China coalfield[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2018, 37(5): 191-199.
- [6] 顾鸿宇, 马凤山, 王东辉, 等. 基于水化学数据的矿山涌水水源识别: 主成分分析与残差分析[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(1): 132-142.
GU Hongyu, MA Fengshan, WANG Donghui, *et al.* Identification

of mine water inrush based on hydrochemical data: principal component analysis and residual analysis [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(1): 132-142.

- [7] 袁文华, 桂和荣. 任楼煤矿地温特征及在水源判别中的应用[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2005, 25(4): 9-11.
YUAN Wenhua, GUI Herong. The characteristics of geothermal temperature and its application in distinguishing the source of water in Ren Lou Mine[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2005, 25(4): 9-11.
- [8] 陈陆望, 桂和荣, 殷晓曦, 等. 临涣矿区突水水源标型微量元素及其判别模型[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(3): 17-22.
CHEN Luwang, GUI Herong, YIN Xiaoxi, *et al.* The standard type trace elements and the discriminant model of water bursting source in the Linhuan coal district[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(3): 17-22.
- [9] 朱乐章. 利用水化学特征识别朱庄煤矿突水水源[J]. 中国煤炭, 2018, 44(5): 100-104.
ZHU Yuezhong. Identification of water inrush source of Zhuzhuang Coal Mine based on hydrochemical characteristics[J]. China Coal, 2018, 44(5): 100-104.
- [10] 杨中元, 丁凤帆, 黄平华. 矿井突水水源的 PCA-GRA 判别模型研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(12): 84-87.
YANG Zhongyuan, DING Fengfan, HUANG Huaping. Research on PCA-GRA discrimination model of water inrush source in mines[J]. Coal Technology, 2019, 38(12): 84-87.
- [11] 刘国伟, 马凤山, 郭 捷, 等. 多元统计分析在滨海矿区水源识别中的应用: 以三山岛金矿为例[J]. 黄金科学技术, 2019, 27(2): 207-215.
LIU Guowei, MA Fengshan, GUO Jie, *et al.* Application of multi-variate statistical analysis to identify water source in coast mine area: as example of Sanshandao Gold Mine[J]. Gold Science and Technology, 2019, 27(2): 207-215.
- [12] 王心义, 赵 伟, 刘小满, 等. 基于熵权-模糊可变集理论的煤矿井突水水源识别[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2433-2439.
WANG Xinyi, ZHAO Wei, LIU Xiaoman, *et al.* Identification of water inrush source from coalfield based on entropy weight-fuzzy variable set theory[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2433-2439.
- [13] 王 亚, 周孟然, 闫鹏程, 等. 基于极限学习机的矿井突水水源快速识别模型[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2427-2432.
WANG Ya, ZHOU Mengran, YAN Pengcheng, *et al.* A rapid identification model of mine water inrush based on extreme learning machine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2427-2432.
- [14] 汪 洋, 左文喆, 王斌海, 等. 矿井突水水源判别方法研究进展[J]. 现代矿业, 2018, 34(1): 69-73.
WANG Yang, ZUO Wenzhe, WANG Binhai, *et al.* Study progress of discriminant method of the sources of mine water inrush[J]. Modern Mining, 2018, 34(1): 69-73.
- [15] 宫凤强, 鲁金涛. 基于主成分分析与距离判别分析法的突水水源识别方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 236-242.

- GONG Fengqiang, LU Jintao. Recognition method of mine water inrush sources based on the principal element analysis and distance discrimination analysis[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(2):236-242.
- [16] 王 亮, 廖晓雪, 查梦霞, 等. 基于主成分分析法的松软煤体煤尘润湿特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2):104-109. WANG Liang, LIAO Xiaoxue, ZHA Mengxia, *et al.* Study on wetting characteristics of coal dust in soft coal based on principal component analysis[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2):104-109.
- [17] 韩佳明, 高 举, 杜 坤, 等. 煤矿地下水库水体水化学特征及其成因解析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11):223-231. HAN Jiaming, GAO Ju, DU Kun, *et al.* Analysis of hydrochemical characteristics and formation mechanism in coal mine underground reservoir[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11):223-231.
- [18] 曲兴玥, 邱 梅, 施龙青. 基于因子-聚类分析的矿井水源识别[J]. 煤炭技术, 2018, 37(12):137-139. QU Xingyue, QIU Mei, SHI Longqing. Recognition method of mine water sources based on factor analysis and cluster analysis[J]. Coal Technology, 2018, 37(12):137-139.
- [19] HOOPER R P. Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry[J]. Water Resources Research, 2003, 39(3):249-256.
- [20] 王玉雪. 山东龙口地区海水入侵过程中的水文地球化学作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [21] 虞未江. 莱州湾东北岸地区海水入侵动态变化规律研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.